

자계소호 원리를 이용한 전력전자형 고장전류제한기 구조에 관한 기초연구

강지성*, 지근양**, 정원식***, 문영현***
 한국전력거래소*, 한국전력공사**, 연세대학교***

Basic study on developing Power-SemiConductor-Type Fault Current Limiter based on Magnetic Turn-Off principle

Ji-Seong Kang*, Geun-Yang Ji**, Won-Sik Jung***, Young-Hyun Moon***
 Korea Power Exchange*, Korea Power Electric Corp.**, Yonsei University***

Abstract - 본 논문에서는 자계소호(Magnetic Turn-Off) 원리를 이용한 전류제한기를 제안하였다. 본 한류기는 전력전자 소자를 이용하여 고장시 신속한 제어가 가능하고, 동작시 역전압 및 반발력이 발생하지 않으므로 고도의 동작 신뢰성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 또한 본 한류기는 유도형 초전도 한류기와 원리는 유사하나, 초전도 소자를 사용하지 않으므로 극저온 유지장치를 제거할 수 있고 퀘치시 복귀 기술이 별도로 필요하지 않다는 장점이 있다. 따라서 본 한류기를 우리나라 전력계통에 적용한다면 차단기의 재폐로 동작책무를 완벽하게 만족하는 안정적인 계통운영이 가능할 뿐 아니라, 고장전류 증가에 따른 차단기 교체비용 절감이 가능하다.

1. 서 론

우리나라는 전력수요가 꾸준히 증가하는 추세를 나타내고 있으며, 이에 따라 전력설비 또한 점차 대규모화 되고 있다. 전력설비가 증가함에 따라 전력설비의 고장발생으로 인한 고장전류 또한 증가하고 있으며, 이는 기존에 설치된 전력설비의 차단용량을 초과하고 있는 실정이다.

이러한 상황에서 기술적으로나 경제적으로 전력설비의 안정적인 운영을 위하여 전력계통에 고장이 발생할 경우 고장전류를 감소시켜 이를 용이하게 차단할 수 있는 장치, 즉 전류제한기의 개발이 필수적이게 되었다.

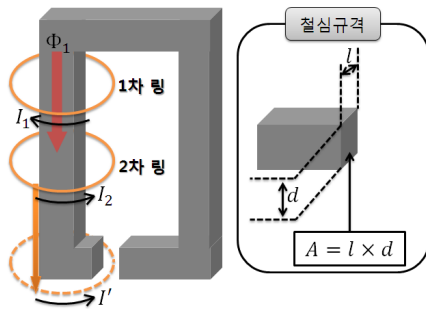
전류제한기는 정상상태에서는 전력계통에 미치는 영향이 작아야 하고, 고장상태에서는 인지 즉시 고장전류를 감소시킴으로써 작은 용량의 차단기로도 안전한 차단 성능을 확보할 수 있도록 해야 한다. 또한 고장 차단 후 일정시간이 지난 후 재투입하는 일련의 동작, 즉 차단기의 동작 책무와도 협조할 수 있어야 한다[1]. 이와 같은 성능을 만족하는 전류제한기를 사용한다면 현재 차단기 제작에 소요되는 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 미래에도 차단용량 증가에 따른 교체비용의 절감이 가능하다[2].

본 논문에서는 전력계통에서 고장이 발생하였을 경우 고장전류 인지 즉시 전류제한기의 자계소호(Magnetic Turn-Off)를 이용하여 인덕턴스를 변화시킴으로써 순간적으로 역기전력을 발생시키고, 이에 따라 전력계통의 고장전류를 감소시키는 전류제한기 구조를 제안하였다.

2. 본 론

2.1 자계소호(Magnetic Turn-Off)

자계소호(Magnetic Turn-Off, 이하 MTO)는 초전도 링의 성질에 의해 설명이 가능하다. <그림 1>에서 철심에 초전도 링(1차 링)이 감겨 있고 전류 I_1 이 흐르고 있다고 하자.



<그림 1> Magnetic Turn-Off 원리

이 상태에서, 전류가 흐르지 않는 또 다른 초전도 링(2차 링)을 철심 안쪽으로 밀어 넣으면, 2차 링에는 같은 크기의 역방향 전류인 I_2 가 흐

르게 된다. 또한 2차 링을 다시 철심 밖으로 뽑아내면, 2차 링의 전류는 다시 0이 된다[3][4].

1차 및 2차 링이 초전도체가 아니더라도, 이 작용은 성립한다는 사실을 식의 유도를 통해 알 수 있다. <그림 1>에서 2차 링을 뽑아낼 때, 공극을 통과해 빠져 나가면서 2차 링에 흐르는 전류는 I_2 에서 I 로 변하게 될 것이다. 이 때 이동하는 2차 링에 작용하는 자속 Φ_2 및 인덕턴스 L_2 의 관계는 다음과 같다. R 은 자기저항(Reluctance)을 나타낸다.

$$L_2 = \frac{N_2 \Phi_2}{I_2} = \frac{N_2}{I_2} \times \frac{N_2 I_2}{R_2} = \frac{N_2^2}{R_2}$$

그리고 플레밍의 오른손 법칙에 의해 이동하는 2차 링에 발생하는 유도기전력은 다음과 같이 계산 가능하다.

$$V_e = L_2 \frac{dI_2}{dt} = Bv = B \left(\frac{dx}{dt} \right)$$

이제 2차 링이 공극을 통과하는 시간을 Δt , 그 이동거리를 Δx 라고 하면 전류의 변화량인 ΔI 를 알 수 있다.

$$\int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} L_2 \frac{dI_2}{dt} dt = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} B \left(\frac{dx}{dt} \right) dt$$

$$[L_2 I_2(t)]_{t_0}^{t_0 + \Delta t} = [Bx(t)]_{t_0}^{t_0 + \Delta t}$$

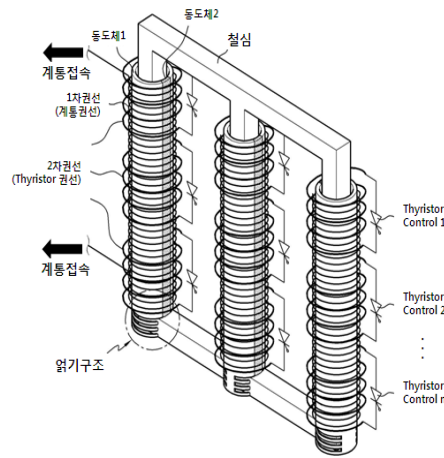
$$L_2 \Delta I = B \Delta x$$

$$\therefore \Delta I = \frac{Bd}{L_2} = \frac{RBd}{N_2^2} = \frac{R}{N_2^2} \left(\frac{N_2 I_2}{R_2 A} \right) (ld) = \frac{I_2}{N_2}$$

ΔI 의 크기가 I_2 와 같으므로 <그림 1>에서 I 는 0이 된다. 즉 빠져나오는 순간 I_1 에 의한 유도전류는 모두 상쇄되고, I 가 0이므로 스파크의 발생도 없음을 알 수 있다. 이 현상, 즉 2차 링의 전류를 소거시키는 작용을 MTO라고 한다. 본 논문에서 제안하는 전류제한기는 MTO의 원리와 Thyristor 제어를 이용한 MTO-Fault Current Limiter(FCL)이다.

2.2 MTO-FCL의 구조 및 동작

MTO-FCL의 구조는 MTO 원리를 변압기 형태로 구현한 것과 같다.



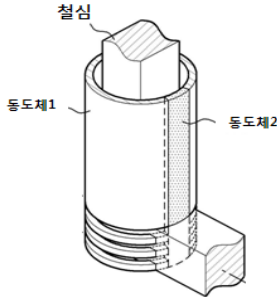
<그림 2> MTO-FCL의 구조

<그림 2>와 같이 계통 접속 단자는 전류제한기 내에서 마치 변압기의 권선과 같이 철심에 감기게 되며, 그 바깥으로 양 단자가 Thyristor

에 의해 단락 접속된 2차 권선이 감긴다. 1차와 2차 권선의 감긴 방향은 서로 반대로 한다. 또한 1차 권선과 철심 사이에는 MTO를 구현할 동도체(Copper Conductor)가 감기게 되는데, 여기서 철심의 공극과 누설 리액턴스 최소화를 위해 엮기구조라는 특별한 구조를 채용하였다.

2.2.1 엮기구조

MTO-FCL의 엮기구조란 동도체가 철심을 통과하며 감기되, 동도체와 철심간 전기적 절연은 물론 기계적 결합의 안정성도 확보하는 조건을 동시에 만족시키기 위해 고안된 구조를 일컫는다.



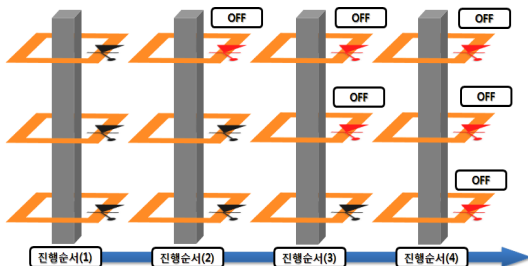
<그림 3> MTO-FCL의 엮기구조

동도체1은 경동 재료로서 <그림 3>과 같이 하부가 갈퀴 모양으로 철심을 통과하도록 제작한다. 동도체2는 이 구조로부터 자유로운 분리·결합이 가능해야하므로 연동재질을 사용하였다. 동도체를 1과 2로 구분한 이유는 동도체2만이 기계적으로 분리되었다가 다시 결합될 수 있는 구조를 만들기 위함이다. 즉, 평상시에는 동도체1과 2가 결합되었다가 고장시 동도체 2가 철심 아래로 분리된다.

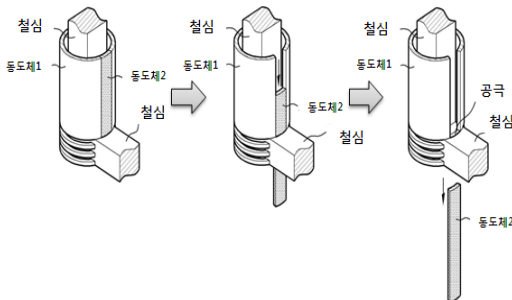
2.2.2 전류제한 동작 과정

평상시 전류제한기 내의 1차 권선은 계통에 흐르는 전류에 의해 자속 Φ_1 을 발생시킨다. 2차 권선은 1차 권선과 반대 방향으로 감긴 구조이고 Thyristor는 ON 상태이므로 2차 권선에서 발생하는 자속 Φ_2 는 Φ_1 을 상쇄하는 작용을 한다. 결합된 동도체1·2 역시 1회 권선으로 볼 수 있으므로 동도체에서 발생하는 자속 Φ_3 역시 Φ_1 을 상쇄한다. 즉 누설이 없다고 가정하면, $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$ 이 성립하여 계통에 미치는 영향이 없는 상태가 된다. 그러나 현실적으로 누설 자속을 완전히 없앨 수는 없으므로 평상시 전류제한기는 계통의 리액턴스로 해석할 수 있다.

이후 고장시에는 <그림 4>와 같이 Thyristor가 동시에 OFF 되면서 2차 권선의 기능이 사라지고 $\Phi_2 = 0$ 이 된다.



<그림 4> 한류과정1 : Thyristor OFF



<그림 5> 한류과정2 : 동도체 분리

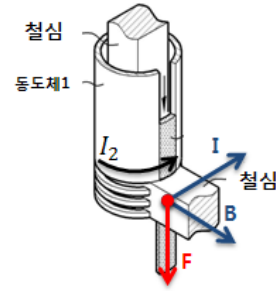
2차 권선 개방이 완료되면 <그림 5>와 같이 엮기구조의 동도체2가 뽑아져 나오면서 $\Phi_3 = 0$ 이 된다. 즉 1차 권선에 의한 Φ_1 을 억제하는 요

소가 모두 사라진다. 따라서 1차 권선에 의한 자속 Φ_1 이 철심에 원활하게 흐르면서 리액턴스가 발생하고, 이 리액턴스가 고장전류를 제한한다.

2.2.3 2차 권선 역전압과 동도체 동작력 확보 문제

앞 절의 동작 과정에서 Thyristor를 동시에 OFF 하지만, 실제로 정확히 동시에 제어되지는 불가능하다. 미소한 동작시간차에 의해 항상 마지막에 OFF되는 Thyristor가 존재하므로, 만약 동도체가 없다면 이 마지막 Thyristor로 Φ_1 에 의한 모든 역전압이 유기될 것이다. 그러나 여기서 동도체가 완충 역할을 하게 되어 2차 권선이 개방되는 시점에서도 $\Phi_1 + \Phi_3 = 0$ 을 유지한다. 즉 동도체는 2차 권선의 개방 과정에서도 1차 권선의 자속을 상쇄하는 완충역할을 담당한다. 따라서 역전압의 유기 없이도 Thyristor 제어에 의해 2차 권선을 안전하게 개방할 수 있다.

한편, 동도체2를 분리하는 과정에서 작용하는 힘은 <그림 6>과 같이 플레밍의 왼손 법칙에 의해 빠져나오는 순방향으로 힘이 작용한다[5].



<그림 6> 동도체2에 작용하는 힘

이 순방향의 힘에 의해, 최소한의 동작력 만으로도 MTO-FCL의 동작이 가능하다. 따라서 한류과정에 필요한 기계적 조작력을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다.

경우에 따라서는 기계적으로 동작하는 동도체 부분 역시 전력전자 소자에 의한 제어구조로 대체 가능하다. 이 경우 전력전자 소자만으로 한류기가 동작하므로 고도의 동작 신뢰성을 확보할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서 제안한 한류기는 기본적으로 자계소호의 원리를 이용하였고, 자계소호를 구현하기 위해 기계적으로 엮기구조를 채용하여 한류효과를 강화하였다.

본 한류기는 평상시에는 각 권선에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되어 발생하는 전압강하가 없는 상태이다가 고장전류 발생시 순간적으로 자속을 발생시켜 인덕턴스에 의한 역기전력을 유기함으로써 계통에 흐르는 고장전류를 제한한다. 이때 한류 과정에서 나타날 수 있는 문제, 즉 Thyristor에 유기되는 역기전력에 의한 소손과 기계적 동작력 확보의 어려움을 자계소호와 엮기구조를 통해 해결한다는 점이 본 한류기의 특징이다. 엮기구조는 자속의 누설과 탈락하는 면적을 둘 다 최소화함으로써 안정적인 한류 효과를 보장하고, 동도체가 아래 방향으로 탈락 가능하게 함으로써 자계소호 현상을 이끌어낸다.

본 한류기의 추가적인 장점으로는, 초전도 소자를 사용하지 않고 대신 전력전자 소자에 의한 제어구조를 채용함에 따라 극저온 유지장치를 제거할 수 있고 퀀치와 복귀에 대한 우려가 없다는 점이다.

다만 엮기구조의 실제 제작시에도 기술적으로 누설자속을 충분히 줄일 수 있는가에 대한 실험과 검증은 필요하다. 또한 1차 권선의 자계 임피던스로 인하여 정상상태에서도 전류제한기에 일정한 전압강하가 발생할 것이 예상됨에 따라 초고압 전력계통에 사용하기 위해서는 이에 대한 개선점을 찾을 수 있는 연구개발이 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 하경훈, '재폐로 동작에 따른 초전도 한류기의 회복성능 분석', 전기학회논문지, 제60권 제5호, pp.1073~1077, 2011.
- [2] Lee.B.W, 'Design and experiments of novel hybrid type superconducting fault current limiters', IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 18, Issue 2, pp.624~627, 2008.
- [3] 배인수, '초전도한류기의 신뢰도에 관한 연구', 조명·전기설비학회논문지, 제25권 제1호, pp.101~106, 2011.
- [4] 최수근, '전압증가 시 재폐로 동작에 따른 변압기형 초전도 한류기의 특성 분석', 전기학회논문지, 제59P권 제4호, pp.477~480, 2010.
- [5] 지근양, 'Magnetic Switching을 이용한 직류회로 순간전류제한기', 대한전기학회 전력기술위원회 추계학술대회 논문집, pp28~30, 2008.